



APLICAÇÃO DE MODELOS HIDRODINÂMICOS UNI E BIDIMENSIONAL NA BACIA DO RIO GRANDE - MG

Isadora Chiamulera¹; Rosana de Fátima Colaço Gibertoni^{2}; José Luis Pinho³; Bernardo Lipski⁴;
Rubem Luiz Daru⁵ & Alberto Assis dos Reis⁶*

Resumo – O presente artigo faz uma análise da calibração do modelo hidrodinâmico uni e bidimensional aplicado à bacia do Rio Grande, na localidade da cidade de Ribeirão Vermelho em Minas Gerais. O software SOBEK foi utilizado para a implementação dos modelos que foram devidamente calibrados. Apresenta-se a discretização utilizada para representar adequadamente uma ponte rododiferroviária inundável, uma vez que a utilização de uma única estrutura não se revelou suficiente para simular as características de escoamento da forma desejada. Além disso, foram analisados em detalhe os métodos que o software SOBEK possui para transmitir as informações entre os modelos uni e bidimensional. Com o objetivo de aprimorar a modelagem foram utilizados artifícios do software para determinar a partir de qual elevação os modelos 1D e 2D seriam utilizados. Os resultados indicam que a consideração do escoamento bidimensional favorece o desempenho do modelo, visto que proporciona um maior detalhamento na representação da região.

Palavras-Chave – SOBEK, Modelagem hidrodinâmica uni e bidimensional, Bacia hidrográfica do rio Grande.

APPLICATION OF ONE AND TWO-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC MODELS TO RIO GRANDE-MG RIVER BASIN

Abstract – This paper analyzes the calibration of a one and two-dimensional hydrodynamic model of Rio Grande-MG river basin, near the city of Ribeirão Vermelho in Minas Gerais. The SOBEK software was used for the implementation of the models that was properly calibrated. The discretization to adequately represent flooding over a road-railway bridge is characterized, since the use of a unique structure it was not sufficient to simulate the flow characteristics as desired near the bridge. In addition available software options for sharing of data between one and two-dimensional models are analyzed. In order to improve the modeling results proper software options were used to determine the water surface elevation to activate the 1D and 2D modules. Results indicate that consideration of two-dimensional flow improve the model performance, since it provides a more detailed representation of the flooded area.

Keywords – SOBEK, One and two-dimensional hydrodynamic modelling, Rio Grande river basin.

¹ Afiliação: LACTEC/CEHPAR – CP 19.067, CEP 81531-980, Curitiba – PR. Fone: (41) 3361-6282. E-mail: isadora.chiamulera@lactec.org.br

^{2*} Afiliação: LACTEC/CEHPAR – CP 19.067, CEP 81531-980, Curitiba – PR. Fone: (41) 3361-6282. E-mail: rosana@lactec.org.br

³ Afiliação: CTAC – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, Portugal, jpinho@civil.uminho.pt

⁴ Afiliação: LACTEC/CEHPAR – CP 19.067, CEP 81531-980, Curitiba – PR. Fone: (41) 3361-6707. E-mail: bernardo.lipski@lactec.org.br

⁵ Afiliação: LACTEC/CEHPAR – CP 19.067, CEP 81531-980, Curitiba – PR. Fone: (41) 3361-6368. E-mail: daru@lactec.org.br

⁶ Afiliação: CEMIG – Av. Barbacena, 1200, Belo Horizonte – MG, CEP 30190-131. Fone: (31) 3506-4611. E-mail: betoreis@cemig.com.br



INTRODUÇÃO

A disponibilidade da água para abastecimento humano e geração de energia, em termos quantitativos e qualitativos representa um desafio para a sociedade. Em todo o mundo, existe uma necessidade crescente de soluções integradas em relação à água, que levem em consideração os diversos fatores que influenciam os fenômenos hidrológicos e dependência entre eles. O gerenciamento dos eventos extremos, por exemplo, estão diretamente associados à previsão de vazão e à gestão dos reservatórios. Os modelos hidrodinâmicos são ferramentas que podem auxiliar em tomadas de decisão, prevendo e/ou minimizando a ocorrência de enchentes através da adequada gestão de descargas em reservatórios. A qualidade dos modelos de simulação de inundações, baseados em princípios hidrodinâmicos, melhorou significativamente na última década.

Neste artigo é apresentada uma análise da calibração dos modelos hidrodinâmicos uni e bidimensional com o propósito de estimar níveis de inundação utilizando o programa SOBEK. O trabalho está inserido no contexto do projeto de pesquisa “Implantação de Sistema para Acoplamento de Modelos e Informação Telemétrica Visando à Otimização da Operação de Reservatórios em Tempo Real, com Foco no Controle de Cheias” proposto pela Companhia Energética de Minas Gerais S.A. (CEMIG) e fomentado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Este projeto de P&D está sendo executado pelos Institutos LACTEC, com consultoria da DELTARES. O principal objetivo do projeto é o de construir ferramentas avançadas para a previsão de enchentes. Estas ferramentas serão utilizadas para a mitigação do prejuízo causado pelas enchentes em trechos de rio a jusante de barragens, considerando a otimização na operação dos reservatórios das usinas hidrelétricas.

O software SOBEK foi escolhido para a previsão de eventos de cheia uma vez que pode ser aplicado em domínios uni e bidimensionais. Este software consiste em um conjunto de módulos integrados que permitem a simulação hidrológica através de modelos de chuva-vazão em bacias hidrográficas e realizam a propagação do escoamento ao longo dos canais naturais do sistema fluvial. Ele também pode ser aplicado a sistemas urbanos (DELTARES, 2011). O presente artigo apresenta a calibração dos modelos hidrodinâmicos uni e bidimensional para a bacia do rio Grande.

PROGRAMA SOBEK

O SOBEK foi desenvolvido pela DELTARES em parceria com o Instituto de Gestão das Águas Interiores e Tratamento de Águas Residuais do governo Holandês (Inland Water Management and Waste Water Treatment – RIZA) para a simulação hidrodinâmica de rios, estuários e redes de drenagem. O software pode ser aplicado na simulação de gerenciamento de recursos hídricos, prevenção de cheias, projetos de canais, sistemas de irrigação, qualidade da água, navegação e dragagem. Assim, o SOBEK consiste de um conjunto de módulos testados e validados, associados e integrados uns aos outros (DELTARES, 2011). Estes módulos representam fenômenos e processos físicos com precisão em sistemas unidimensionais e bidimensionais.

O módulo hidrodinâmico do SOBEK estima o fluxo de água através da resolução completa das equações de Saint-Venant. O fluxo unidimensional é determinado através das equações da continuidade 1D e da conservação da quantidade de movimento 1D. Para o fluxo bidimensional três equações devem ser resolvidas, a da continuidade 2D e a da conservação da quantidade de movimento 2D nas direções x e y . As condições iniciais utilizadas para os cálculos são o nível da superfície livre ou profundidade e a vazão no início da simulação (DELTARES, 2013).



A calibração do modelo hidrodinâmico é realizada com base nos valores da rugosidade da calha do rio e da planície de inundação e de séries de dados de vazão e níveis em diferentes locais do domínio simulado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo: Bacia do Rio Grande

O rio Grande tem suas nascentes na Serra da Mantiqueira, no município de Bocaina de Minas, a uma altitude de aproximadamente 1.980 m. Drena uma área de cerca de 143.000 km² e percorre 1.360 km até desaguar no rio Paranaíba, formando o rio Paraná. A área de estudo do projeto compreende a bacia de contribuição formada até a cidade de Ribeirão Vermelho, com área de drenagem de 15.765 km², equivalente a cerca de 11% da bacia do Rio Grande, estando totalmente contida na região do Alto Rio Grande.

A bacia do Alto Rio Grande apresenta coeficiente de compacidade de 1,925, que por ser um valor alto, indica que a bacia tem formato irregular, distinto do formato circular, alto tempo de concentração e reduzida tendência para grandes enchentes. Já o valor do fator de forma encontrado ($K_f = 0,965$) indica que a bacia apresenta uma largura da mesma ordem de grandeza do comprimento axial, o que revela propensão a enchentes. Essa mesma característica é indicada pelo valor da densidade de drenagem, D_d , estimado em 0,198 km/km², o que indica uma bacia com baixa capacidade de drenagem, logo com maior suscetibilidade a enchentes (LACTEC, 2013). Na porção estudada desta bacia estão contidos os reservatórios das UHEs Camargos, Itutinga e Funil (Figura 1).

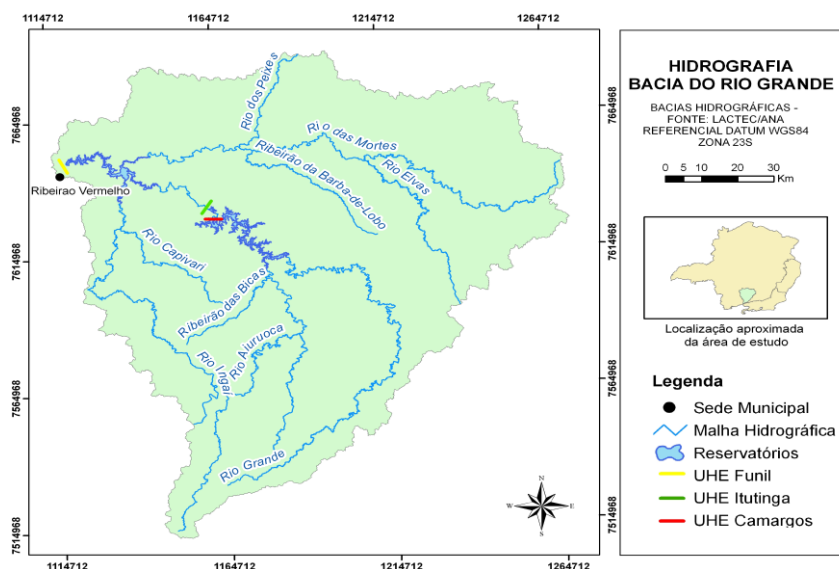


Figura 1 – Hidrografia da região de estudo.

A cidade de Ribeirão Vermelho é sujeita a inundações, sendo assim, a aplicação de uma ferramenta de otimização de operação de reservatórios pode mitigar o prejuízo causado a jusante das barragens comprometendo minimamente o aproveitamento energético das usinas hidrelétricas (LACTEC, 2013). O início da área urbana de Ribeirão Vermelho ocorre a cerca de 5 km a jusante da casa de força e barragem da UHE Funil. O trecho urbano possui uma extensão de pouco mais de 3 km e é cortado por uma ponte rododiferroviária. Localizada a mais de 230 km a jusante ao longo do



rio Grande, encontra-se a barragem de Furnas, operada pelo Sistema Furnas. Apesar da distância, os níveis de água deste reservatório podem influenciar os níveis em Ribeirão Vermelho.

Implementação do modelo hidrodinâmico 1D

O modelo hidrodinâmico foi configurado em um trecho de cerca de 60 km a jusante da UHE Funil, para o qual estão disponíveis 29 seções topobatimétricas. As vazões defluentes da usina de Funil correspondem à condição de contorno de montante. As vazões incrementais e do principal afluente (rio do Cervo) são obtidas através da modelagem hidrológica. As condições de contorno de jusante consideradas foram os níveis da UHE Furnas.

A Figura 2 apresenta o perfil longitudinal do trecho de interesse do rio Grande para o qual foi implementado o modelo hidrodinâmico. A linha em vermelho representa a localização da seção transversal da ponte rodoferroviária de Ribeirão Vermelho, onde se situa a estação telemétrica de mesmo nome, operada pela CEMIG. Esta estação é a única disponível no trecho com monitoramento de níveis. Assim foi adotada como referência para a comparação dos níveis observados e estimados na determinação do coeficiente rugosidade.

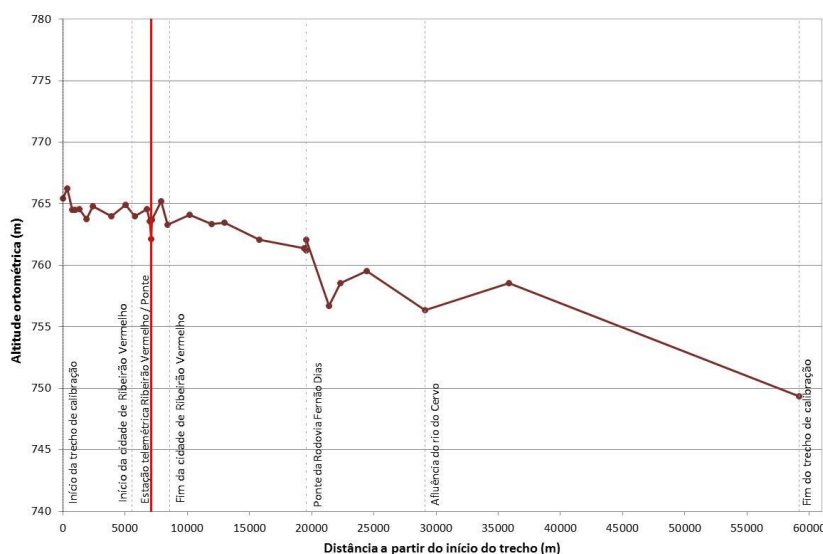


Figura 2 - Perfil longitudinal do trecho de interesse no Rio Grande.

Uma das dificuldades encontradas na implementação do modelo foi a representação da ponte rodoferroviária. O Sobek disponibiliza quatro tipos de nós específicos para pontes. Entretanto, nenhum destes nós permite isoladamente representar adequadamente o formato desta ponte. Assim, foi considerada uma estrutura artificial com um circuito paralelo, utilizando num dos ramos um nó de barragem do tipo soleira e no outro um nó de orifício.

O nó de orifício representa a área livre para escoamento abaixo do vigamento da ponte, e é primeiramente considerado pelo escoamento por suas cotas estarem a um nível mais baixo. Os dados necessários para inserção no modelo são as dimensões do orifício retangular (largura, altura), bem como a cota do fundo que deve corresponder a mais próxima possível da cota de fundo da seção transversal natural abaixo da ponte. A altura deve ser igual a altura do vão livre. As dimensões do orifício devem ser tais que igualem a sua área com a área livre abaixo da ponte (descontadas as áreas das faces dos pilares quando existentes).



O nó de barragem do tipo soleira é considerado após o escoamento ocupar a área máxima do orifício, fazendo o nível barrado pela barragem se elevar até a cota da crista da soleira e permitindo o seu livre escoamento sobre a soleira após isto. Neste nó é necessário fornecer a crista da soleira (cota do tabuleiro da ponte) e a seção transversal que representa o corte real do terreno acima do tabuleiro. Os principais dados da ponte do trecho do rio Grande foram fornecidos pela CEMIG ou obtidos do perfilhamento a laser. Os dados não fornecidos foram estimados através de imagens.

Implementação do modelo hidrodinâmico 2D

A implementação do modelo hidrodinâmico 2D foi realizada com a inserção dos Modelos Digitais de Terreno e de Elevação (MDT e MDE) obtidos através do perfilamento a laser realizado pelo LACTEC. Os MDT's são utilizados para representar o relevo de uma região, já os MDE's levam em consideração também a cobertura vegetal e a área urbana do local, quando presentes. Neste estudo era necessário um modelo que apresentasse conjuntamente o relevo da região e as edificações da área urbana. A cobertura vegetal deveria ser desprezada, pois não representa uma barreira invencível para a água, diferentemente das edificações. Através da utilização de uma macro desenvolvida para ser utilizada no aplicativo TerraScan®, foi possível obter uma combinação dos modelos digitais de modo que a região fosse representada da forma adequada. Apesar dos dados terem sido obtidos em uma escala de 1x1m esse grau de detalhamento não pode ser utilizado devido às limitações de processamento computacional, neste caso foi utilizada uma grade com resolução espacial de 40x40m.

O software SOBEK permite a simulação simultânea de domínios 1D e 2D. Neste caso a malha bidimensional sobrepõe-se à rede unidimensional. A gestão desta combinação de domínios nas zonas onde se sobrepõem é realizada de duas formas distintas: (1) ignorando ou (2) considerando as extensões das seções transversais do módulo unidimensional acima da cota da célula da malha sobreposta. É permitido adotar apenas uma das duas opções para a mesma modelagem.

Na primeira opção, se o nível da superfície livre for inferior à cota da célula sobreposta da malha 2D o escoamento será puramente unidimensional. Se for superior teremos quer escoamento unidimensional para cotas inferiores, quer bidimensional para cotas superiores.

Na segunda opção, as células da malha 2D sobrepostas ao modelo 1D são elevadas até à cota definida pela extremidade mais alta ou mais baixa da seção transversal (conforme especificado pelo usuário), só passando a existir escoamento 2D se a superfície livre ultrapassar esta cota.

De forma geral, deseja-se que a transferência ocorra logo após a modelagem unidimensional preencher a calha principal, ou seja, que a modelagem bidimensional fosse utilizada apenas para representar cotas que inundem à planície de inundação. Em qualquer um dos métodos, as cotas do modelo digital referentes à calha do rio interferem na transferência de informações. No primeiro método, esta interferência ocorre de forma direta, visto que é esta cota que especifica a passagem do 1D para o 2D. No segundo método, a cota do pixel onde está inserido o nó da seção transversal é elevada para a cota especificada como limite para transferência dos modelos. Porém as cotas dos pixels do entorno são mantidas as mesmas. Esta é uma das razões pela qual o próprio manual do SOBEK recomenda que a largura da célula deva ser maior que a largura do canal. Para o rio em questão, cuja largura da calha principal possui entre 80 e 130 m, seguir esta recomendação significaria perder muito em precisão do modelo digital. Esta limitação foi contornada elevando artificialmente as cotas das células internas às calhas do rio para valores iguais aos das margens, visto que o escaneamento a laser foi realizado em época de seca.



Outro item que mereceu especial atenção foi em relação à representação da ponte na modelagem bidimensional. Neste trecho em especial, tomou-se o cuidado que a transferência entre as modelagens ocorresse a uma cota aproximadamente igual ao valor correspondente a face inferior do vigamento da ponte. Assim, garantiu-se que o escoamento sob a ponte aproveitasse todo o vão livre da seção através da modelagem 1D. Caso a transferência entre modelos ocorresse a uma cota menor que a da face inferior do vigamento, o barramento caracterizado pela forma de representar uma ponte em modelo digital geraria uma resistência ao escoamento maior que a real. Para permitir a seleção da cota adequada de transferência foi selecionado o segundo método de transferência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O evento de calibração selecionado para a bacia do rio Grande corresponde à cheia ocorrida em janeiro de 2012. Esta cheia foi selecionada através da observação dos hidrogramas disponíveis para a estação Ribeirão Vermelho (sendo esta uma das maiores enchentes cujos dados são disponíveis). Imagens disponibilizadas na internet ajudaram a inferir as cotas de cheias atingidas na região próxima à estação, especialmente no local da ponte ferroviária.

O coeficiente de rugosidade foi inicialmente calibrado considerando apenas a modelagem unidimensional. Diversos coeficientes de rugosidade foram aplicados, diferenciando valores ao longo do perfil longitudinal. A variação do coeficiente de rugosidade também foi aplicada, considerando fundo, paredes da calha principal e planície de inundação.. Apesar destas tentativas, o caso que permitiu melhor aderência entre os perfis simulados e observados considerou um coeficiente de rugosidade constante para todo trecho e ao longo de toda a extensão da calha principal e planície de inundação. Sendo assim, o valor do coeficiente Manning de $0,035 \text{ s.m}^{-1/3}$ foi adotado para todas as seções transversais e considerado constante ao longo das mesmas.

O coeficiente de rugosidade já calibrado na modelagem unidimensional representou perfis d'água com limite máximo em cada seção igual à cota da planície que margeia o rio. Após isto, na calibração bidimensional, o coeficiente de Manning utilizado pelo modelo é o ajustado para a planície de inundação, cuja verificação considerou também a estação Ribeirão Vermelho.

Com a inserção da malha 2D houve uma diferença significativa nos resultados dos modelos uni e bidimensional. Os coeficientes de Manning que permitiram o melhor ajuste foram $0,035 \text{ s.m}^{-1/3}$ para o canal e $0,05 \text{ s.m}^{-1/3}$ para a malha.

A Figura 3 apresenta os níveis calculados e observados em Ribeirão Vermelho para os modelos uni e bidimensional no pico de cheia (período de 01/12/11 a 04/02/2012). Para os coeficientes de rugosidade utilizados nos modelos 1D e 2D, verifica-se que as linigramas superestimam as vazões baixas e subestimam as vazões altas. A análise visual permite concluir que a inclusão da malha 2D possibilita um melhor desempenho do modelo, pois apresenta um refinamento na representação da região. Além disso, foram calculados alguns indicadores de desempenho, entre eles, destaca-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe, para o qual os modelos uni e bidimensional obtiveram resultado de 0,906 e 0,922, respectivamente, calculados para todo o período de calibração (18/09/2011 a 04/02/2012). Nesta análise se confirma a superioridade do modelo bidimensional.

Na Figura 4 é apresentada a ortofotocarta da área modelada bidimensionalmente, considerando o pico da inundação simulada com o evento da calibração. As áreas que apresentaram inundação mantêm correspondência com imagens obtidas durante a ocorrência deste evento na região.

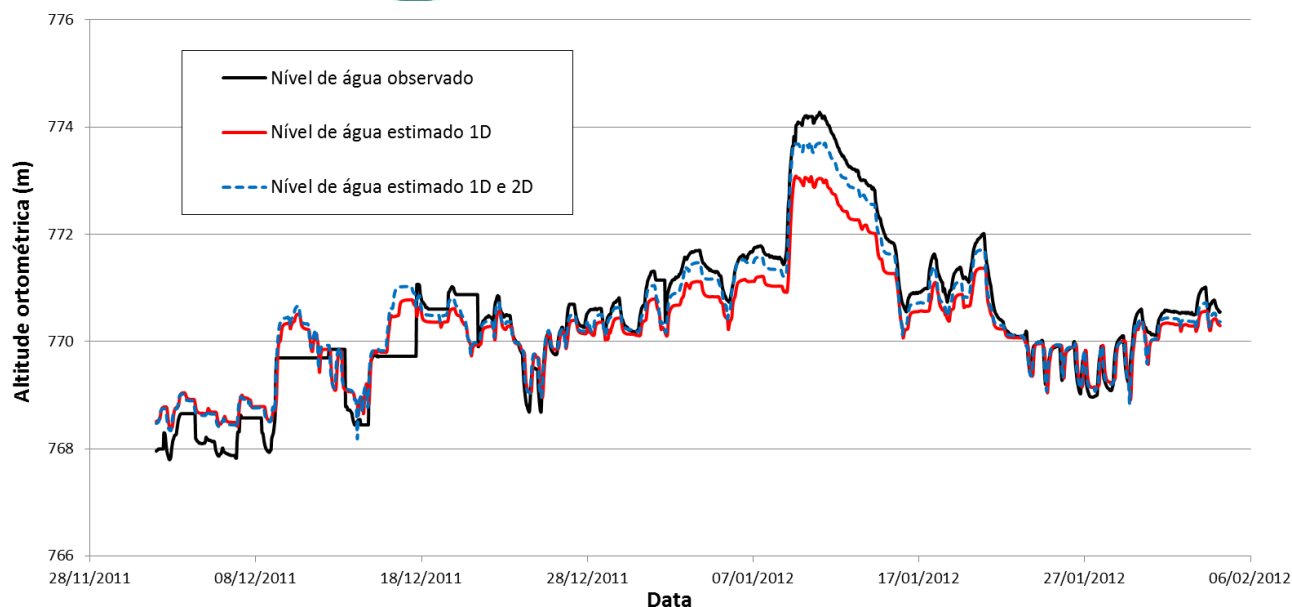


Figura 3 - Níveis observados e estimados em Ribeirão Vermelho para os modelos uni e bidimensional.

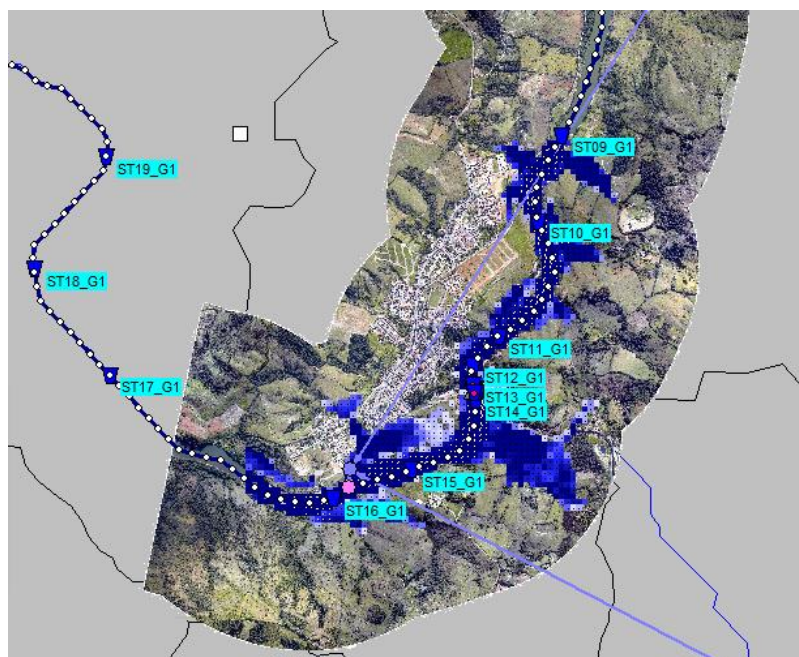


Figura 4 - Ortofotocarta da área modelada bidimensionalmente

CONCLUSÕES

A calibração do modelo hidrodinâmico para a bacia do rio Grande mostrou resultados satisfatórios. A modelagem 1D, quando aplicada exclusivamente, permitiu uma estimativa subestimada do pico de cheia. Seria possível, através do ajuste do coeficiente de Manning, adequar melhor as vazões de pico, entretanto, isto levaria a vazões superestimadas na estiagem. Como explicado anteriormente, foram realizadas tentativas de adequar conjuntamente os níveis na estiagem e na cheia através da utilização da distinção de rugosidades dentro da calha principal. Este recurso, no entanto, não permitiu atingir o objetivo inicial, pois verificou-se que a rugosidade das



paredes das seções transversais do trecho analisado possuem influência insignificante nos níveis, e que a rugosidade do leito influencia de maneira muito similar tanto às menores vazões quanto às vazões de cheia.

A combinação dos modelos 1D e 2D permitiu um satisfatório equilíbrio na aderência de eventos de secas e de cheias, melhorando significativamente os resultados para o período de cheia. No período de seca os resultados foram similares aos obtidos com a calibração 1D. Além dos bons resultados obtidos, a utilização do modelo 2D tem como vantagem a possibilidade de visualizar imediatamente as manchas de inundação. Esse recurso auxilia na tomada de decisão, prevendo e/ou minimizando a ocorrência de enchentes.

A representação da ponte rodoferroviária por meio de uma estrutura artificial com circuito paralelo se mostrou eficaz. Através da observação dos resultados no nó de barragem foi possível constatar a passagem da água somente durante o pico de cheia, quando de fato a água ultrapassou o limite da soleira da ponte. Sendo assim, verifica-se que o modelo utilizou corretamente a estrutura implementada, que além de ser mais adequada para o caso ainda é mais versátil, podendo ser modificada para a representação de qualquer tipo de ponte.

O software SOBEK se mostrou uma ferramenta eficaz para a modelagem uni e bidimensional. O método de solução adotado no software permitiu a simulação tanto do período aqui apresentado, como de outros períodos, sem a ocorrência de instabilidade. Infelizmente, não se dispõe por ora de um maior número de pontos de controle ao longo do rio para permitir uma verificação mais detalhada das rugosidades da calha e planície alagável. A única seção de controle localiza-se junto a face de jusante da ponte rodoferroviária, indicando um local cujos níveis são afetados tanto pela geometria natural das seções do entorno quanto pela própria estrutura da ponte. Este último fator exige que o escoamento sob e sobre a ponte seja representado o mais próximo possível do real, a fim de permitir seguramente a comparação valores simulados e observados neste local. Atualmente, está sendo realizado o processamento de imagens de satélite para a comparação de áreas inundáveis e verificação dos coeficientes de rugosidade aqui adotados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia Energética de Minas Gerais S.A. e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais como responsáveis pelo devido apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

DELTARES. (2011). “SOBEK Suite”. Disponível em: < <http://delftsoftware.wldelft.nl/> > Acesso em abril de 2015.

DELTARES. (2013). “SOBEK User Manual”. Disponível em: < <http://delftsoftware.wldelft.nl/> > Acesso em abril de 2015.

LACTEC – INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO (2013). “Implantação de Sistema para Acoplamento de Modelos e Informação Telemétrica Visando à Otimização da Operação de Reservatórios em Tempo Real, com Foco no Controle de Cheias. Relatório Técnico nº 4 – Caracterização Fisiográfica das Bacias Hidrográficas do Grupo 2.” Relatório Técnico: Curitiba.